

Tedarik Zincirinde Dijital Dönüşüm, Verimlilik, İzlenebilirlik, Güvenilirlik ve Sürdürülebilirlik

Hakan Ezici¹

Muhammed Parlak²

Özet

Tedarik zinciri yönetiminde teknoloji kullanımı, tedarik zincirinin organizasyonunu ve kapsamını destekleyen bir uygulama olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, modern tedarik zincirlerinin ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik mevcut araçları ele alarak teknolojinin bu süreçlerin ayrılmaz bir parçası haline gelmesiyle tedarik zincirinin nasıl daha verimli ve başarılı işlediğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Teknolojinin tedarik zinciri yönetimindeki rolü, lojistik ve müşteri hizmetlerinden depo yönetimine ve tedarikçi iş birliğine kadar çeşitli alanlarda maliyetleri düşürmeye ve performansı artırmaya yardımcı olur. Teknolojiyi tedarik yönetimi ve lojistik uygulama geliştirme süreçlerine entegre etmenin anahtarı, malların ve malzemelerin gerçek zamanlı takibini sağlayan gelişmiş görünürlük ve şeffaflıktır. İşletmelerin süreçlerinde değişiklik yapmalarına ve operasyonlarını optimize etmelerine olanak tanıyan bu gelişmiş bilgiler, potansiyel darboğazların ve verimsizliklerin önceden belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Tedarik Zinciri Yönetimi (TZY), güvenlik, gizlilik, izlenebilirlik, şeffaflık, veri doğruluğu, mahremiyet, verimlilik, hesap verebilirlik ve güvene odaklanır; bunların tümü dijital teknolojiler tarafından önemli ölçüde geliştirilmiştir. Artan küreselleşme ve rekabet, şirketleri dijitalleşmeyi benimsemeye yöneltmiş ve Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ, blok zinciri, büyük veri analitiği ve robotik sistemler, tedarik zincirlerinin daha esnek ve verimli hale gelmesini sağlamıştır. Bu çalışma, literatür taramasıyla teknolojik dönüşümün sağlayabileceği faydaları vurgulamaktadır. Bulgular, dijital teknolojilerin sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için stratejik bir zorunluluk haline geldiğini göstermektedir.

1 Dr.Öğr.Gör, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, hakan.ezici@yeniuyuzyl.edu.tr, 0000-0002-9402-792X

2 Öğr.Gör. İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, muhammed.parlak@yeniuyuzyl.edu.tr, 0000-0002-6485-5556

1. Giriş

Üretim ve küresel ticaretin hızla dijitalleştiği günümüzde tedarik zinciri yönetimi, yalnızca fiziksel mal akışını değil; aynı zamanda bilgi ve veri akışını da kapsar hale gelmiştir (Ivanov, 2023). Artan rekabet, çeşitlenen müşteri talepleri ve sürdürülebilirlik baskıları, işletmeleri süreçlerini yeniden tasarlamaya zorlamaktadır. Bu bağlamda dijital teknolojilerin entegrasyonu; verimlilik, şeffaflık, izlenebilirlik ve çevresel performans açısından kritik bir rol üstlenmektedir (Kache ve Seuring, 2017).

Yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ), tedarik zinciri yönetimini güçlendirmede etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu ileri teknolojiler, işletmelerin tedarik zinciri süreçlerini planlama, yürütme ve yapılandırma biçimlerini köklü biçimde dönüştürmektedir. YZ ve MÖ'nün bu alandaki en önemli uygulamalarından biri, yüksek doğrulukta talep tahmini sunma kapasiteleridir (Banur vd. 2024).

Bu çalışma, yapay zekâ, blok zinciri, dijital ikizler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi ileri teknolojilerin operasyonel faaliyetleri ve sürdürülebilirlik uygulamalarını nasıl yeniden şekillendirdiğini ortaya koyarak tedarik zinciri yönetimindeki dijital dönüşüme ilişkin gelişmekte olan literatüre katkı sunmaktadır. Bu teknolojileri çoğunlukla birbirinden bağımsız ele alan önceki çerçevelerden farklı olarak, bu çalışmanın bulguları söz konusu teknolojilerin görünürlüğü artırma, verimsizlikleri azaltma ve çevresel hedefleri eş zamanlı olarak desteklemedeki bütünleşik rolünü gözler önüne sermektedir.

Bbu çalışma, teknoloji benimsenmesi ile sürdürülebilir lojistik arasındaki kavramsal bağı güçlendirmektedir. Tedarik zinciri sürdürülebilirliğinin yalnızca karbon metrikleri veya mevzuata uyum çerçevesinde değil; gerçek zamanlı veri entegrasyonu, sistem yanıt verebilirliği ve dijital dayanıklılık perspektifinden de değerlendirilmesi gerektiği görüşünü pekiştirmektedir.

Öte yandan analiz, operasyonel mükemmellik ile çevresel sorumluluğun birbirini dışlayan hedefler olmadığını; aksine, stratejik teknoloji kullanımının birbirini tamamlayan sonuçları olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, dijitalleşme ile ekolojik sorumluluk arasındaki sinerjik potansiyeli çoğunlukla göz ardı eden geleneksel tedarik zinciri teorilerine yeni bir boyut katmaktadır.

Akademik literatürden elde edilen bulguları inceleyen bu çalışma, gelecekteki araştırmalar için bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. Ele alınan araştırma soruları şunlardır:

Tedarik zinciri yönetiminde dijital teknolojilerin temel uygulama alanları nelerdir? Dijital teknolojiler, tedarik zinciri yönetiminde şeffaflık, güvenlik ve verimliliğin artırılmasında ne ölçüde etkilidir? Tedarik zinciri yönetiminde

dijital teknolojilerin uygulanması ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişki nasıl tanımlanabilir?

2. Literatür İncelemesi

2.1 Dijital Dönüşüm ve Endüstri 4.0

Küreselleşen tedarik zinciri, üstesinden gelinmesi gereken birçok zorluğu beraberinde getirmiştir. İzlenebilirlik ve güvenilirlik, bunların en önemlileri arasındadır. Endüstri 4.0, tedarik zinciri ve lojistik alanlarında dijitalleşme süreçlerine öncülük etmiştir. Tedarik zinciri dijitalleşmesinde entegrasyonu sağlamanın en önemli desteği, bilgi teknolojilerinden gelmektedir. McKinsey & Company'ye göre, kuruluşlar yapay zekâyı tedarik zinciri yönetimine entegre ederek yıllık 1,3 ila 2 trilyon dolar arasında değer yaratabilir (www.mckinsey.com). PricewaterhouseCoopers (PwC) tahminlerine göre, yapay zekâ 2030 yılına kadar küresel ekonomiye 15,7 trilyon dolardan fazla katkıda bulunabilir (www.pwc.com). Yapay zekâ, büyük miktarda veriyi işlemede üstünlük göstererek talep tahminini önemli ölçüde iyileştirir. Gerçek zamanlı veri sağlayan sensörler gibi teknolojik kaynaklar, tedarik zinciri yönetimini daha verimli hale getirmektedir. Yeni nesil teknolojiler, siparişler, stok seviyeleri, ulaşım ağları, iş gücü kullanımı ve depo faaliyetleri gibi kritik operasyonel verilerin toplanmasını ve tüm tedarik zinciri paydaşlarının erişimine sunulmasını sağlar. Böylece şirketlerin tedarik zinciri süreçlerini uçtan uca izlemelerine olanak tanıyarak karar verme süreçlerinde daha fazla çeviklik ve doğruluk sağlar. Yapay zekâ, verileri analiz ederek daha doğru tahminler ve bilinçli kararlar alınmasını mümkün kılar. Teknoloji, tedarik zinciri yönetimde çevikliği artırır. Bilgiye ve simülasyonlara daha iyi erişim sayesinde yöneticiler daha iyi içgörüler elde ederek sorunları çok daha hızlı çözmelerine veya yeni iş fırsatları yaratmalarına olanak tanır. Tedarik zinciri yönetimde teknoloji kullanımı, kuruluşlara hassas, güncel verilere anında erişim imkânı sunarak yöneticilerin ve karar vericilerin güncel bilgilere dayanarak bilinçli kararlar almalarını ve potansiyel sorunları erken tespit etmelerini sağlar.

2.2. Tedarik Zincirinde Uygulama Alanları

Tedarik zinciri yönetimde teknoloji kullanımı hızla dönüşüm geçirmektedir. Eskiden yalnızca evrak işleri ve hesap tablolarıyla sınırlı olan bu süreç, artık IoT teknolojilerini kapsamaktadır. Lojistik ve tedarik zincirlerindeki dijital dönüşümü daha iyi anlamak için, işletmeler tarafından kullanılan tedarik zinciri teknolojilerinin yaygın uygulamalarını incelemek çok önemlidir. Günümüzde birçok işletme, gerçek zamanlı veri toplama, otomasyon, yapay zekâ tabanlı tahmin sistemleri, IoT (Nesnelerin İnterneti) çözümleri ve bulut

tabanlı bütünleşmiş platformlar gibi teknolojileri tedarik zinciri süreçlerine entegre ediyor. Bu teknolojiler, sipariş takibi, envanter yönetimi, tedarikçi performansı, ulaşım rotası optimizasyonu ve iş gücü planlaması gibi temel lojistik faaliyetlerinin daha verimli, şeffaf ve çevik bir şekilde yürütülmesini sağlıyor. Özellikle gelişmiş tedarik zincirlerine sahip şirketler, bu sistemleri kullanarak tüm operasyonlarını uçtan uca izleyebilir, hataları erken tespit edebilir, kaynak kullanımını iyileştirebilir ve müşteri memnuniyetini artırabilir. Dijital teknolojilerin yaygın olarak benimsenmesi, rekabet avantajı elde etme, maliyetleri düşürme ve karbon ayak izini azaltma gibi stratejik hedefler doğrultusunda lojistik yönetimini yeniden şekillendirmektedir. Lojistik sektöründe kullanılan en son teknolojik gelişmelerden bazıları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tedarik Zinciri Yönetimini Etkileyen En Yeni Teknolojiler

2.2.1 Blok zinciri teknolojisi: Blok zinciri verileri depolayan ve kaydeden, merkezi olmayan, dağıtılmış, değiştirilemez bir defter teknolojisidir. Blok zincirleri, akıllı sözleşmeler, mülk kayıtları, sağlık hizmetleri, bankacılık, finans ve daha birçok sektörde kullanılmaktadır (Kolehmainen vd., 2010). Bir blok zincirindeki her blok, belirli veriler, bir zaman damgası ve önceki bloğa bir referans içerir ve böylece güvenli, kronolojik bir zincir oluşturur. En etkili katkıları arasında gelişmiş izlenebilirlik, iyileştirilmiş takip ve akıllı sözleşmelerin uygulanması yer almaktadır. Blok zinciri altyapısının temel bir unsuru olan akıllı sözleşmeler, önceden tanımlanmış kurallar ve koşullar tarafından yönetilen, kendi kendini yürüten anlaşmaların oluşturulmasına olanak tanır. Tedarik zincirinde iş akışlarının yürütülmesini otomatikleştirerek, akıllı sözleşmeler operasyonel verimliliği, hızı ve güvenliği artırır. Merkezi olmayan ve güven

gerektirmeyen bir ortamda çalışarak, aracı veya merkezi otoritelerin gerekliliğini ortadan kaldırır, böylece maliyetleri düşürür ve şeffaflığı artırır (Andrian vd., 2018).

İzlenebilirlik açısından bakıldığında, blok zinciri teknolojisi, bir ürünün ham maddesinden ürüne dönüşümüne, satış için sözleşmeli şirketlere teslimine, ürün satıldıktan sonraki tüm garanti süresinin takibine ve yapılan onarımların kaydedilmesine, ürün el değiştirdiğinde yeni sahibinin sisteme girilmesine ve son olarak kullanılamaz hale geldikten sonra geri dönüşümüne kadar tüm adımları izlemek için tedarik zincirlerinde kullanılabilir. Bu şekilde, blok zinciri teknolojisi güvenilir ve doğrulanmış bir lojistik sistemi ve tedarik zinciri bilgi alışverişi ağı sağlar (Takaoğlu vd., 2019).

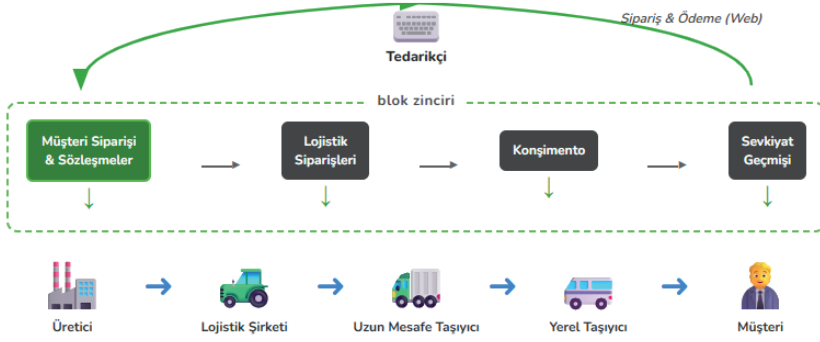
Bu ağ ayrıca, bitmiş ürünlerin tüm dağıtım aşamalarının izlenmesine de olanak tanır. Walmart, blok zinciri teknolojisini iki kez başarıyla test etti. Çin'de üretilen domuz eti ve Meksika'da yetiştirilen mangolar, üreticiden son tüketiciye kadar tüm yolculukları boyunca izleniyor. Bu izleme yeteneği, halk sağlığını tehdit eden geri çağırma durumlarında çok önemlidir (Sharma & Kumar, 2021).

Bir gıda ihlali durumunda, etkilenen ürün partilerini belirlemek kolaylaşacaktır. Yalnızca söz konusu ürünlerin imha edilmesi yeterli olacak; bu sayede tüm stokun yok edilmesi önlenerek, önemli maliyetlerden kaçınmayı sağlayacaktır. Böylece hem halk sağlığını korumak hem de bir şirketin marka imajına potansiyel zararı sınırlamak mümkün olacaktır.

Tüm ağ kullanıcıları, zincirde gerçekleşen tüm işlemleri eş zamanlı olarak görüntüleyebilir. Verilere erişim herkese açıktır. Dağıtılmış defterler aracılığıyla depolama, sistemdeki verilerin bozulmasını veya değiştirilmesini önler. Kayıtlar değiştirilemediği ve veriler birden fazla düğüm tarafından doğrulandığı için süreç kontrolü artar, bu da sisteme olan güveni artırır. Tüm geçmiş bilgiler geriye doğru izlenebildiği için tahmin kapasitesini artırabilir. Sistemdeki tüm bilgiler oybirliğiyle ve kontrollü bir şekilde kaydedildiği için veri doğruluğu ve kalitesi yüksektir. Sistemin kendisi yüksek düzeyde güvenlik sunduğu için, mevcut sistem içinde siber saldırılara karşı önlemler uygulama çabası azaltılabilir ve bu önlemlerin maliyetlerinden tasarruf sağlanabilir. İşlemler ve kontroller otomatikleştirildiği için insan hatası sayısı azalır. Dağıtık yapısı sayesinde veriler birden fazla düğümde saklanır ve bu bilgiler yalnızca ağ katılımcılarının mutabakat ve onayıyla değiştirilebilir.

Şekil 2'de görüldüğü gibi, blok zinciri uygulamaları, RFID, barkodlar, otomatik kimlik tarayıcıları ve benzeri yöntemler kullanılarak tüm tedarik zinciri yönetim sürecini her adımda eş zamanlı ve şeffaf bir şekilde izlemek

için kullanılabilir (Bakan ve Şekkeli, 2019). Gıda tedarik zincirine entegre edilecek olan blok zinciri teknolojisi, tüketicilerin güvenilir, şeffaf, izlenebilir ve yüksek kaliteli ürünler tüketmesini sağlayarak müşteri endişelerini ortadan kaldıracak bir sistemdir (Yıldızbaşı ve Üstünyer, 2019).



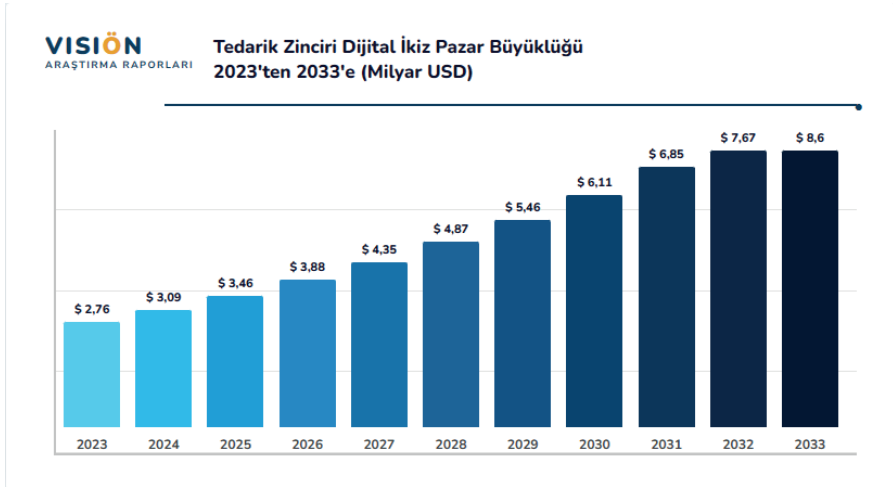
Şekil 2. Blok Zinciri İş Akışı

2.2.2 Dijital ikiz teknolojisi: Dijital ikiz, gerçek dünyadaki bir tedarik zincirini yansıtan, dinamiklerine dair içgörüler sağlayan ve sonuçları tahmin eden sanal bir simülasyondur. Gerçek dünyadaki bir sistemin, sürecin veya nesnenin sanal bir kopyasının veya ayna görüntüsünün oluşturulmasını sağlayarak inovasyon, verimlilik artışı ve karar verme fırsatları sunar (Menon vd., 2023). Bu nedenle, dijital ikizler ürün tasarımlarının, envanter yönetiminin, malzeme kullanımının, taşımacılığın ve teslim sürelerinin kolayca ve doğru bir şekilde ayarlanmasını ve optimize edilmesini sağlar (Lam vd., 2023). Operasyonlarda, lojistikte ve tedarik zinciri yönetiminde dijital ikiz uygulamaları, özellikle operasyonel izlenebilirlik, taşıma bakımı, uzaktan yardım, varlık görselleştirme ve tasarım özelleştirme için önemlidir. Moshood vd. (2021), tedarik zinciri görünürlüğünün çok önemli olduğunu ve küresel bir tedarik zinciri ağında tam görünürlüğü sağlamak ve sürdürmek için yeni geliştirilen dijital teknolojilerin kullanılması gerektiğini belirtmiştir (Moshood vd., 2021).

Abideen ve Mohamad (2021), üretim ve tedarik zinciri sistemlerindeki çeşitli operasyonları değerlendirmek ve bunların organizasyonel performans ve büyüme üzerindeki etkilerini incelemek için dijital ikiz (DT) yaklaşımını kullanmıştır. Dijital ikizler, kalıpları tespit ederek ve süreç değişikliklerinin etkilerini simüle ederek verimliliği artırır. Örneğin, DT modelleri, değişiklikler uygulanmadan önce sonuçları tahmin edebilir, potansiyel faydaları değerlendirebilir ve yatırım getirisini tahmin edebilir. Organizasyonlar, üretim

seviyeleri, envanter stratejileri ve teslimat yöntemleriyle ilgili farklı senaryoları simüle ederek küresel operasyonları yeniden tasarlamak için dijital ikizleri kullanabilir. Tedarik zinciri süreçlerine uçtan uca, veri odaklı bir bakış açısı sunarak, dijital ikizler minimum insan müdahalesiyle darboğazları belirlemeye ve çözmeye yardımcı olur. Örneğin, bir sevkiyatın dijital ikizi, taşıma ve teslimat sırasında performansı izlemek ve sorunları tespit etmek için sensör verilerini kullanır. Bu yaklaşım, daha hızlı sorun çözümü ve daha duyarlı tedarik zinciri yönetimi sağlar. Ayrıca, dijital ikizler, talep ve arz değişimlerinin fiziksel altyapıyı nasıl etkilediğini analiz ederek lojistik ve tesis yönetimini optimize eder. Gerçek zamanlı verilerden yararlanarak, taşıma planlamasını ve kaynak tahsisini iyileştirir ve sonuç olarak operasyonel verimliliği artırır.

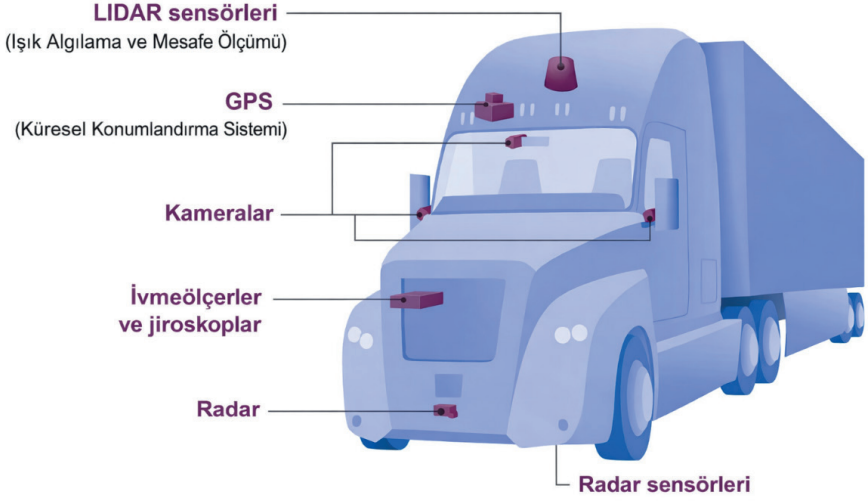
Tedarik zinciri dijital ikiz pazarının üstel büyümesi, genişlemesini yönlendiren birkaç önemli faktöre bağlanabilir. Birincisi, IoT cihazları ve yapay zekâ gibi gelişmiş teknolojilerin artan entegrasyonu, tedarik zinciri operasyonlarının doğruluğunu ve verimliliğini artıran gelişmiş dijital ikiz modellerinin geliştirilmesini hızlandırmıştır. İkincisi, tahmine dayalı analitik ve gerçek zamanlı veri içgörülerine yönelik artan talep, işletmeleri dijital ikizleri benimsemeye teşvik ederek, pazar trendlerini tahmin etmelerini, envanter yönetimini optimize etmelerini ve üretim süreçlerini kolaylaştırmalarını sağlamıştır. Şekil 3, küresel tedarik zinciri dijital ikiz pazar büyüklüğünün 2033 yılına kadar yaklaşık 8,6 milyar ABD dolarına ulaşmasının ve 2024 ile 2033 yılları arasında %12,03'lük bir yıllık bileşik büyüme oranıyla (CAGR) büyümesinin beklendiğini göstermektedir (visionresearchreports.com).



Şekil 3. Tedarik Zinciri Dijital İkiz Pazarının Büyüklüğü 2023-2033

Dijital ikiz (DT) uygulamaları trafik sıklığının azalmasıyla artan verimlilik, kontrollü alanlar için uyarılar, sıcaklık izleme, tam trafik görünürlüğü ve gerçek zamanlı operasyonel verilerin projeksiyonu tedarik zincirlerinin dijitalleşmesini hızlandırmış ve fiziksel sistemler ile dijital ağların entegrasyonunu sağlamıştır. Nesnelerin İnterneti (IoT), siber-fiziksel sistemler ve yapay zekâ destekli otomasyon çözümleri, envanter ve üretim süreçlerinin gerçek zamanlı yönetimini mümkün kılmaktadır (Tjahjono vd., 2017). Bu dönüşüm, işletmelerin karar alma süreçlerinde veri tabanlı stratejiler geliştirmelerine ve talep tahminlerinin doğruluğunu artırmalarına olanak tanır. Potansiyel faydalarına rağmen, işletmeler arasında Tedarik Zinciri Dijital İkizlerinin yetenekleri ve avantajları konusunda farkındalık eksikliği bulunmaktadır. Bu teknolojinin pratik uygulamaları ve uzun vadeli faydaları hakkında eğitim, şüpheciliğin üstesinden gelmek ve benimsenmesini teşvik etmek için hayati önem taşımaktadır.

2.2.3 Tamamen otonom taşıma araçları: Otonom taşıma araçları dağıtım sürecinde sıklıkla darboğaz oluşturan son kilometre teslimatının uzun süredir devam eden zorluğuna dönüştürücü bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır (zhenhub.com). Ürünler son tüketiciye ulaşsa bile, gecikmeler sık sık yaşanmaktadır. Otonom araçlar (AV'ler), güvenliği, operasyonel verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırarak lojistik ve taşımacılık yönetimini yeniden şekillendirir. Otonom kamyonlardan ve dronlardan kendi kendine yönlenecek gemilere kadar uzanan bu teknolojiler, malların nasıl taşındığını yeniden tanımlayarak daha akıcı ve uygun maliyetli bir gelecek sunar. AV'ler, sensörler, kameralar, radar ve yapay zekâ gibi gelişmiş teknolojilerle donatılmış olup, çevrelerini yorumlamalarına, gerçek zamanlı kararlar almalarına ve karmaşık ortamlarda yüksek hassasiyetle gezinmelerine olanak tanır. Rotaları optimize etme, çarpışmaları önleme ve günün her saati kesintisiz çalışma yetenekleri (Şekil 4'te gösterildiği gibi), teslimat verimliliğinin artmasına ve maliyetlerin düşürülmesine önemli ölçüde katkıda bulunur.



Kaynak: GAO (Government Accountability Office) teknoloji geliştiricileri ile yapılan görüşmelerin analizine dayanmaktadır | GAO-19-161

Şekil 4. Ticari Kamyonlar için Otomatik Araç Teknolojilerine Örnekler. Amerika Birleşik Devletleri Hükümet Hesap Verebilirlik Ofisi

Otonom araçların faydaları şunlardır:

1. Artan Güvenlik: Otonom araçlar, trafik kazalarının önemli bir bölümünden sorumlu olan insan hatasını ortadan kaldırarak yollardaki kazaları ve ölümleri azaltabilir.

2. Azalan Maliyetler: Otonom araçlar 7/24 kesintisiz çalışabilir, bu da birden fazla sürücüye olan ihtiyacı azaltır ve verimliliği artırır.

3. Geliştirilmiş Verimlilik: Otonom araçlar, trafik sıkışıklığını önlemek ve teslimat sürelerini kısaltmak için rotaları optimize edebilir. Son kilometre teslimatlarında, kamyonların yoğun kentsel alanlarda dolaşma ihtiyacını azaltabilirler.

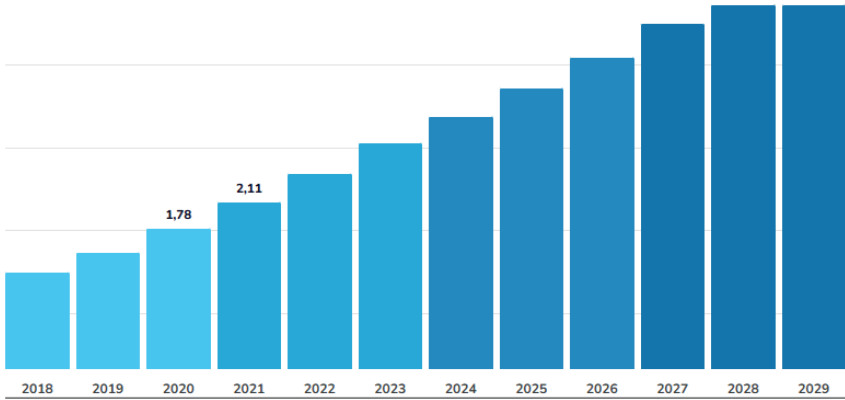
4. Geliştirilmiş Sürdürülebilirlik: Otonom araçlar, yakıt tüketimini ve emisyonları (sektörün karbon ayak izi olarak bilinir) azaltmak için rotaları optimize edebilir.

Sonuç olarak, lojistik ve taşımacılık yönetiminde otonom araçların geleceği umut vericidir ve güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından önemli faydalar sunmaktadır. Üstesinden gelinmesi gereken zorluklar olsa da dönüşüm potansiyeli çok yüksektir.

2.2.4 Robotik, modern depolar; Otomatik depo araçları, otomatik istifleyiciler, forkliftler, palet istifleyiciler ve küçük yük taşıma robotları, depolarda kullanılan otonom araçlara örnek teşkil eder. Bu araçlar, makine öğrenimi ve derin öğrenme kullanarak seçilen yolları takip etmeyi ve ilgili depolama faaliyetlerini gerçekleştirmeyi öğrenirler.

Lojistik tesisleri ve depolar, güvenlik ve haritalama zorluklarını basitleştiren otonom araçlardan büyük ölçüde faydalanır. Bununla birlikte, bu tam olarak forkliftlerin, çekicilerin, toplayıcıların ve diğer lojistik araçlarının işi olduğundan, mekanik işlemler için daha gelişmiş kontrol yetenekleri gereklidir. Bu otonom araçların, uygun kontrol seviyesine ulaşmak için uzaktan operatörlere güvenmeleri gerekecektir. Bu kullanım durumu, çalışanlar için tehlikeleri azaltır. Eklenen güvenlik, fiziksel engelli kişiler için benzersiz istihdam fırsatları da yaratır.

Asya Pasifik Lojistik Robotları Pazar Büyüklüğü, 2018-2029 (Milyar USD)

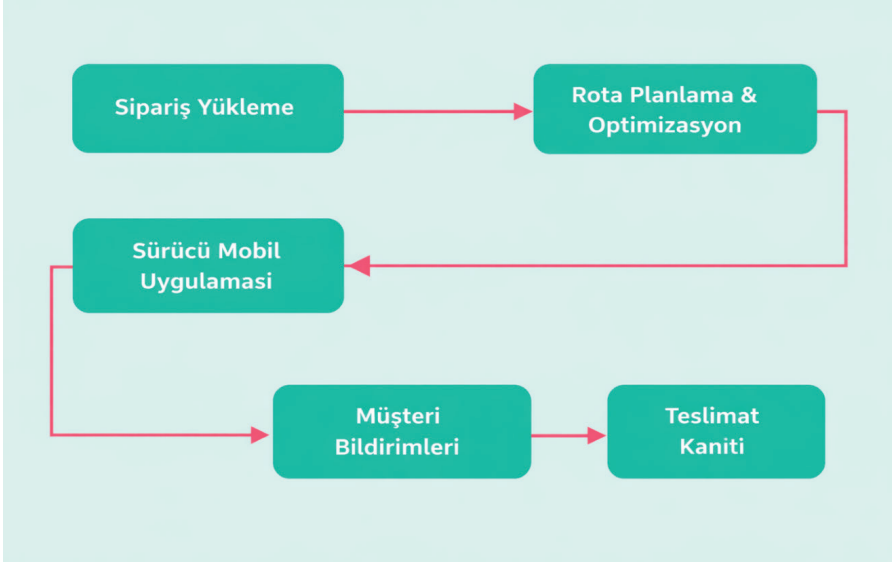


Şekil 5. Asya Pasifik lojistik robotları pazar büyüklüğü.

Şekil 5'te gösterildiği gibi, küresel lojistik robot pazarı 2021 yılında 6,17 milyar ABD doları değerindeydi ve tahmin dönemi boyunca %16,7'lik bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) ile 2029 yılına kadar 21,01 milyar ABD dolarına ulaşması bekleniyor. Sadece 2022 yılında pazar 7,11 milyar ABD dolarına ulaştı. Asya-Pasifik bölgesi, 2021 yılında %34,19'lük payla küresel pazara liderlik etti ve değerler 2020'deki 1,78 milyar ABD dolarından 2021'de 2,11 milyar ABD dolarına yükseldi. Bu arada, özellikle e-ticaret sektörünün hızlı genişlemesiyle önemli bir büyüme göstermesi beklenmektedir (www.fortunebusinessinsights.com).

2.2.5 Akıllı yük ve rota planlama algoritmaları; Teslimatlar için en verimli, maliyet etkin ve güvenli rotaları belirler. Bu özellik, teslimat sürelerini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda lojistik ve tedarik zinciri operasyonlarının genel verimliliğini de artırır. Boş kilometreler, kamyonların yük taşımadan kat ettiği mesafeyi ifade eder ve bu da işletme maliyetlerini, yakıt israfını artırır, filo verimliliğini düşürür ve çevreye zarar verir. Boş kilometrelerin azaltılması, kaynak kullanımını iyileştirir ve operasyonları maliyet etkin hale getirir. Dağıtım operasyonlarında, teslimat hacimleri, filo boyutu ve operasyonel verimlilik arasında denge kurmak özellikle zordur.

Algoritmalar, teslimat lojistiğini optimize etmek ve müşteri iletişimini iyileştirmek için güvenilir, mobil öncelikli bir rota planlayıcısı isteyen işletmeler veya araç sahipleri için mükemmeldir. Şekil 6, teslimat optimizasyon iş akışını göstermektedir.



Şekil 6. Teslimat Optimizasyon İş Akışı

Yük planlaması veya optimizasyonu, araç kapasitesi, kargo hacmi, boyutlar, teslimat rotaları ve diğer faktörleri analiz ederek aşağıdaki faydaları elde etmek için otomasyonu kullanan çok adımlı bir yaklaşımdır. Şekil 7, fayda süreçlerini göstermektedir:



Şekil 7. Akıllı yük ve rota planlama algoritmaları süreçleri.

Daha Düşük Yakıt Maliyetleri- Yakıt fiyatları, kamyon bakımı, sürücü ücretleri, geçiş ücretleri ve kamyon ömrü gibi faktörleri hesaba katarak karlılığı etkileyen önemli bir maliyet faktörüdür. Verimli rota belirleme, yakıt tasarruflu sürüş ve yeterli bakım gibi önlemlerin uygulanması, mil başına maliyeti düşürür ve her yolculuğun kâr marjını artırır.

Hızlı Teslimat- Zamanında teslimat, özellikle zamana duyarlı gönderiler için müşteri memnuniyeti ve sadakati açısından hayati önem taşır. Planlanmamış gecikmeler, taşıyıcı için cezalara ve daha yüksek stok tutma maliyetlerine yol açar ve taşıyıcının itibarını zedeleyerek genel karlılığı olumsuz etkileyebilir.

Müşteri Memnuniyeti- Teslimat zamanlaması, müşteri memnuniyetinin en kritik belirleyicisidir. Sipariş edilen ürünlerin eksiksiz ve vaat edilen zaman dilimi içinde teslim edilmesi, müşteri güvenini artırır. Müşterilere siparişin serbest bırakılması, paketlenmesi, sevkiyatı ve teslimat tarihi hakkında sürekli bilgi sağlamak memnuniyeti artırır. Bu durum, müşteri sadakati ve tekrar satın almalar açısından avantajlar yaratır. Tedarik zincirinin CRM ile entegre edilmesi, müşteri şikayetlerinin ilgili mercilere yönlendirilmesini sağlar. Son kilometre teslimatı (müşterinin kapısına ulaşma süreci) en maliyetli ve sorunlara en yatkın olanıdır.

Bu aşamayı optimize etmek için:

- Yerel depolar ve mikro dağıtım merkezleri

- Coğrafi rota planlaması
- Gerçek zamanlı teslimat haritaları kullanılmalıdır.

Yönetim Maliyetleri- ERP, MRP, WMS ve TMS gibi bütünleşmiş bilgi sistemleri, veri girişi, raporlama, sipariş işleme ve fatura takibini otomatikleştirir. Bu, personel gereksinimlerini ve yönetim maliyetlerini azaltır. Tedarikçiler, üretim, lojistik ve müşteriler arasındaki koordinasyon tek bir platform üzerinden sağlanabilir. Gerçek zamanlı gösterge panelleri, e-posta, telefon ve manuel formlar gibi eski yöntemlerin yerini alarak zaman ve iş gücü maliyetlerini azaltır.

2.2.6 Giyilebilir Teknolojiler: Ürün depolama ve dağıtım sırasında paketlerin tanımlanması, işlenmesi ve elleçlenmesinde doğruluk ihtiyacı son derece önemlidir ve giyilebilir teknolojiler bir çözümdür. Zaman kaybını ortadan kaldırarak çalışan verimliliğini artırır ve hızlı tempolu bir çalışma ortamında stresi azaltır. Bilgisayar/giyilebilir cihaz her zaman kişinin üzerinde olduğundan, çalışanlar barkodları tarayabilir, veri girebilir, bilgi arayabilir, parçaları bulabilir, anlık uyarılar alabilir, yeni bilgilere ulaşabilir ve ellerini serbest bırakarak daha verimli çalışabilirler. Giyilebilir teknolojiler yalnızca insan kaynaklı hataları en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda ürünle ilgili hataları tespit ederek kaliteyi de artırır (Aktaş, 2022).

Akıllı gözlükler ve akıllı saatler, kurumsal ortamlarda en yaygın olarak kullanılan giyilebilir teknolojiler arasındadır. Diğer örnekler arasında giyilebilir tarayıcılar, ses toplayıcılar, akıllı kasklar, kafa bantları, akıllı güvenlik yelekleri ve vücut kameraları yer almaktadır. Depo operasyonlarında, envanter yönetim süreçlerini geliştirmek için giyilebilir teknolojiler giderek daha fazla kullanılmaktadır. Genellikle bileğe, bele veya parmağa takılan bu eller serbest cihazlar, Bluetooth aracılığıyla bağlanır ve dokuz metreye kadar mesafeden kritik verileri iletebilir.

Giyilebilir tarayıcılar, daha düşük toplam sahip olma maliyeti ve azaltılmış cihaz arıza süresi gibi avantajlar sunar. Hafif ve dayanıklı tasarımları, çalışanların toplama ve sıralama gibi görevler için her iki elini de serbest bırakmalarını sağlayarak sayım hatalarını en aza indirir, operasyonel verimliliği artırır ve hem işçilik hem de ekipman maliyetlerini düşürür. Ayrıca, bu cihazlar gerçek zamanlı duruş izleme ve hareket geri bildirimini sağlayarak iş yeri güvenliğini artırır ve çalışanları olaylar meydana gelmeden önce potansiyel olarak güvenli olmayan eylemler konusunda uyararak yaralanmaları önlemeye yardımcı olur.

Lojistik uygulamalarına bir örnek olarak, DHL'nin Hollanda'da piyasaya sürdüğü akıllı gözlükler, iki vardiyada aynı anda dört çalışan tarafından kullanılıyor. Lensler, toplanacak ürün, depodaki konumu ve toplama sepetindeki doğru konumu hakkında bilgi gösterir. Elleçlenen ürünler, eller serbest erişim

sağlayan halka şeklinde bir tarayıcı ile kaydedilir. Ayrıca, sesle etkinleştirme ve depo içindeki optimum rotaların önerilmesi gibi diğer özellikler, operasyonel verimliliği artırır, toplama doğruluğunu iyileştirir ve hataları ve tarama süresini azaltır (www.dhl.com). Depo operatörleri, özellikle sipariş toplama olmak üzere, günlük depo operasyonlarının verimliliğini ve üretkenliğini artırmak için çözümler aramaktadır. Depolar da dahil olmak üzere birçok üretim ve lojistik sistemi hala manuel iş gücüne dayanmaktadır ve sonuç olarak, insan mevcudiyeti ve üretkenliği performans ve maliyetler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sesle yönlendirilen toplamanın en önemli avantajlarından biri, toplama hatalarının azaltılmasıdır. Toplayıcılar gözlerini eyleme odaklayabilir ve elleri serbest kalır, bu da verimliliği artırır. Toplayıcılar tek bir ürüne odaklanabilir. Sesle yönlendirilen toplama teknolojisini kullanmak, depo operatörlerine daha fazla toplama odağı, daha fazla hassasiyet ve daha kolay takip avantajı sunar. Bu teknolojiyi kullanmak sadece iadeleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda genel lojistik maliyetlerini de düşürür.

Giyilebilir cihazların lojistik sektöründe uygulanmasının sağladığı artan güvenlik, artan üretkenlik ve artan çalışan güveni gibi önemli faydalar, giyilebilir cihazların yaygınlaşmasına yardımcı olmaktadır.

2.3 Teknoloji ve Sürdürülebilirlik

Bilgi teknolojileri ve dijital sistemler, karbon ayak izini azaltmada, enerji tasarrufunda ve kaynak kullanımını optimize etmede doğrudan rol oynamaktadır.

Dijital teknolojiler sadece ekonomik performansı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de desteklemektedir. Gerçek zamanlı izleme sistemleri, karbon ayak izini ölçmemize, enerji tüketimini optimize etmemize ve atıkları azaltmamıza olanak tanır. Blok zinciri tabanlı sistemler, tedarik zincirinin tüm halkalarında şeffaflık sağlayarak etik üretim ve yeşil lojistik uygulamalarını güçlendirir (Saberli vd., 2019). Teknolojik uygulamaların sürdürülebilirliğe katkıları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Teknoloji-Sürdürülebilirlik İlişkisi

Teknoloji	Sürdürülebilirlik Katkısı
ERP – MRP Sistemleri	Kaynak verimliliği, üretim planlamasında atık azaltımı
IoT ve Sensör Teknolojileri	Enerji ve kaynak tasarrufu, çevre dostu operasyonlar
Blok Zinciri (Blockchain)	Şeffaf ve etik tedarik zinciri
Yapay Zekâ ve Tahminleme	Talep planlaması, stok optimizasyonu
Gelişmiş Lojistik Yazılımları	Karbon emisyonu azaltımı, daha az yakıt kullanımı
Dijital İzlenebilirlik Çözümleri	Geri dönüşüm ve yeniden kullanım oranlarının artırılması

Dijitalleşme, tedarik zinciri süreçlerine ilişkin sürdürülebilirlik verilerinin kamuoyuyla paylaşılmasını da kolaylaştırmaktadır. Şirketler, bu verileri sürdürülebilirlik raporlarında şeffaf bir şekilde paylaşarak yatırımcı güvenini artırarak, marka itibarını güçlendirir. Bu durum, markaya olan tüketici sadakatini artırır ve işletmelerin küresel pazarlarda daha güçlü bir konum elde etmesine katkıda bulunmaktadır. Bu da gelişmiş dijital teknolojilerin yeşil tedarik zinciri yönetiminde katalizör bir rol oynadığını gösteriyor (Zhao vd., 2021).

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan araştırma, dijital teknolojilerin tedarik zincirlerinde çok boyutlu faydalar sunduğunu göstermektedir:

- **Artan Verimlilik:** Yapay zekâ destekli planlama sistemleriyle üretim döngüsü sürelerinde önemli bir azalma gözlemlenmiştir (Taifa & Vhora, 2019).
- **Maliyet Azaltma:** IoT tabanlı izleme sistemleri sayesinde stok fazlalıkları ortalama %20-30 oranında azaltılmaktadır (Ugbebor vd., 2024).
- **Şeffaflık:** Blok zinciri sistemleri, özellikle gıda ve ilaç sektörlerinde izlenebilirlik standartlarını güçlendirmektedir (Gerdan vd., 2020).
- **Sürdürülebilirlik:** Dijital enerji yönetim sistemleri karbon emisyonlarını %10-25 oranında azaltabilir (Sapci & Considine, 2014).

Bununla birlikte, teknolojik dönüşümün önünde bazı engeller de bulunmaktadır. Yüksek kurulum maliyetleri, veri güvenliği endişeleri ve nitelikli işgücü eksikliği, dijitalleşmenin yaygın olarak benimsenmesini sınırlamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma tedarik zinciri yönetiminde dijitalleşmenin özellikle yapay zekâ (YZ) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin dönüştürücü potansiyelini araştırmıştır. Bulgular, tahmine dayalı analiz, otomatik planlama sistemleri ve gerçek zamanlı izleme gibi YZ odaklı araçların, üretim döngüsü sürelerini kısaltmaya, stok fazlalığını en aza indirmeye ve müşteri memnuniyetini artırmaya önemli ölçüde katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu teknolojiler yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda daha geniş çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerini de destekler.

McKinsey & Company ve PricewaterhouseCoopers (PwC) gibi büyük danışmanlık firmaları, YZ'nin iş operasyonlarına entegrasyonunun 2030 yılına kadar trilyonlarca dolar ekonomik değer yaratabileceğini öngörmektedir. Bu bağlamda akıllı, veri odaklı tedarik zincirlerine geçiş sadece rekabet avantajı değil, stratejik bir zorunluluktur.

Dijital Teknolojilerin Stratejik Entegrasyonu: Firmalar, dijital dönüşümü yalnızca teknolojik bir yükseltme olarak değil, kurumsal vizyonu ortaya çıkan dijital yetkinliklerle uyumlu hale getiren stratejik bir değişim olarak benimsemelidir.

Yapay Zekâ Tabanlı Karar Destek Sistemleri: Talep tahmini, envanter optimizasyonu ve lojistik planlama gibi alanlarda yapay zekanın benimsenmesi, tedarik zinciri genelinde daha hızlı, daha doğru ve daha uygun maliyetli kararlar alınmasını kolaylaştırabilir.

Veri Entegrasyonu ve İş Birliği Platformları: Bulut tabanlı platformlar aracılığıyla paydaşlar arasında sorunsuz entegrasyon, şeffaflığı artıracak, karar alma süreçlerini hızlandıracak ve tedarik zinciri genelinde koordinasyonu iyileştirecektir.

İş Gücü Becerilerinin Geliştirilmesi ve Dijital Okuryazarlık: Dijital dönüşümün başarısı sadece teknolojiye değil, insanlara da bağlıdır. Veri analitiği, dijital araçlar ve yazılım uygulamaları konusunda sürekli eğitim, iş gücünün uyum sağlaması için çok önemlidir.

Sürdürülebilirlik Odaklı Dijital Politikalar: Kuruluşlar, dijital dönüşüm girişimlerini sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirmeli ve çevresel etki, enerji verimliliği ve atık yönetiminin teknolojik yükseltmelerin merkezinde yer almasını sağlamalıdır.

KOBİ'ler için Destek Mekanizmaları: Daha büyük şirketlerin kaynaklarından yoksun olabilecek küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler), devlet teşvikleri, uygun fiyatlı finansman ve dijital dönüşüm rehberlik programları aracılığıyla desteklenmelidir.

Kaynaklar

- Abideen, A., ve Mohamad, F. B. (2021). Improving the performance of a Malaysian pharmaceutical warehouse supply chain by integrating value stream mapping and discrete event simulation. *Journal of Modelling in Management*, 16(1), 70–102.
- Aktaş, İ. (2022). Giyilebilir Teknolojilerin Lojistik Faaliyetlerde Kullanımının ve Etkilerinin Değerlendirilmesi. *Beykoz Akademi Dergisi*, 10(2), 258-273. <https://doi.org/10.14514/beykozad.1177256>
- Andrian, HR. Kurniawan, NB., and Suhardi, S. (2018). “Blockchain technology and implementation: a systematic literature review,” in 2018 international conference on information technology systems and innovation (ICITSI). IEEE, 2018, pp. 370–374.
- Bakan, İ., & Şekkelî, Z. H. (2019). Blok zincir teknolojisi ve tedarik zinciri yönetimindeki uygulamaları. *OPUS International Journal of Society Researches*, 11(18), 2847-2877.
- Mohan Banur, O., Patle, B. K., & Pawar, S. (2024). Integration of robotics and automation in supply chain: a comprehensive review. *Robotic Systems and Applications*, 4(1), 1-19.1
- Gerdan, D., Koç, C., & Vatandaş, M. (2020). Use of Blockchain Technology in Traceability of Food Products. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 16(2), 8-14.
- Ivanov, D. (2023). *Digital supply chain twin: A framework for resilience*. *International Journal of Production Research*, 61(3), 707–723.
- Kache, F., & Seuring, S. (2017). *Challenges and opportunities of digital information at the intersection of big data analytics and supply chain management*. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(1), 10–36.
- Kolehmainen, T., Laatikainen, G., Kultanen, J., Kazan, E., & Abrahamsson, P. (2020, November). Using blockchain in digitalizing enterprise legacy systems: An experience report. In *International Conference on Software Business* (pp. 70-85). Cham: Springer International Publishing.
- Menon, D., Anand, B., & Chowdhary, C. L. (2023). Digital twin: Exploring the intersection of virtual and physical worlds. *IEEE Access*, 11(June), 75152– 75172.
- Moshood, T. D., Nawanir, G., & Sorooshian, S. (2021). Digital twins driven supply chain visibility within logistics: A new paradigm for future logistics. *Applied System Innovation*, 4(29), 1–24.
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). *Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management*. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135.

- Sapci, O., & Considine, T. (2014). *The link between environmental policy and energy efficiency: Empirical evidence*. *Energy Policy*, 73, 249–263.
- Sharma, M. & Kumar, P. (2021). Adoption of Blockchain Technology: A Case Study of Walmart. In R. Bansal, P. Malyadri, A. Singh, & A. Pervez (Eds.), *Blockchain Technology and Applications for Digital Marketing* (pp. 210-225). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8081-3.ch013>
- Taifa, I., & Vhora, T. (2019). Cycle time reduction for productivity improvement in the manufacturing industry. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 6(2), 147-164.
- Takaoglu, M., Özer, Ç. ve Parlak, M. (2019). Blokzinciri Teknolojisi ve Türkiye'deki Muhtemel Uygulanma Alanları. *International Eastern Anatolia Science Engineering and Design Journal*. 1(2): 265-273.
- Ugbebor, F., Adeteye, M. & Ugbebor, J. (2024). Automated Inventory Management Systems with IoT Integration to Optimize Stock Levels and Reduce Carrying Costs for SMEs: A Comprehensive Review. November *Journal of Artificial Intelligence General science (JAIGS) ISSN 3006-4023* 6(1):306-340
- Yıldızbaşı, A. ve Üstünyer, P. (2019). Tarımsal Gıda Tedarik Zincirinde Blokzincir Tasarımı: Türkiye'de Hal Yasası Örneği. *Bartın Faculty of Forestry Journal*. 21(21): 460.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). *What does Industry 4.0 mean to supply chain?* *Procedia Manufacturing*, 13, 1175–1182.
- <https://zhenhub.com/blog/otonom-araclar/ZhenHub>. (nd). The Impact of Autonomous Vehicles in Logistics, (ET. 07 October)
- <https://www.visionresearchreports.com/supply-chain-digital-twin-market/40859> (ET. 05 October)
- <https://www.gao.gov/assets/gao-19-161.pdf> (ET 10 October)
- <https://www.fortunebusinessinsights.com/logistics-robots-market-102923> (ET 25 September)
- [https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/dhl-successfully-tests-augmented-\(reality-application-in-warehouse](https://www.dhl.com/global-en/delivered/innovation/dhl-successfully-tests-augmented-(reality-application-in-warehouse). (ET. 25 September).
- <https://www.pwc.com/gx/en/issues/analytics/assets/pwc-ai-analysis-sizing-the-prize-report.pdf> (ET. 01 October).